

Ventilación pasiva y confort término en vivienda de interés social en clima ecuatorial

Passive ventilation and thermal comfort
for public housing in ecuatorial climate

Walter Giraldo*

Carlos A. Herrera**

Universidad del Valle (Colombia)

* Arquitecto, magíster en Arquitectura y Urbanismo con énfasis en arquitectura bioclimática. Profesor auxiliar Escuela de Arquitectura. Universidad del Valle, Facultad de Artes Integradas. waltergiraldoc@gmail.com

** Ingeniero mecánico, Ph.D., profesor titular, Escuela Ingeniería Mecánica y Escuela de arquitectura, Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Énfasis en ventilación y climatización pasiva y mecánica, iluminación natural, transferencia de energía en edificaciones, control de infecciones aéreas por medios pasivos y mecánicos en hospitales, eficiencia energética y sostenibilidad. carlos.herrera@correounivalle.edu.co

Correspondencia: Walter Giraldo. Carrera 41 n° 8-43, of. 201. Cali (Colombia). Tel: 3165786016.

Resumen

En general, el confort y la calidad de aire no son tenidos en cuenta por los diseñadores de viviendas de interés social (VIS), ni lo son tampoco los asuntos de sostenibilidad ecológica como, por ejemplo, la ventilación natural. Dos condiciones empeoran esta situación: la primera, que se desconoce el manejo científico del confort a través de estrategias pasivas, y la segunda, que no es redituable para los constructores ni para el Estado. En las zonas tropicales cercanas al ecuador, climatizar con ventilación natural se complica con la alta insolación al mediodía (870 W/m^2) y el viento en calma. Aquí se propone una solución que ofrece confort y calidad de aire a través de manejo de ventilación y carga térmica; su desempeño y efectividad se evaluó en un prototipo experimental que simula una habitación de VIS en Cali (Colombia). Se encontró que en la configuración original típica, las VIS son completamente inhabitables durante la mayor parte del día, pero con algunas modificaciones de bajo presupuesto es posible mejorarlas hasta niveles aceptables en términos de confort y salubridad. En particular las chimeneas solares resultaron muy efectivas por la inducción de corrientes de aire durante el periodo de viento en calma. Las alternativas estudiadas resultaron funcionales en diseños nuevos o en remodelaciones.

Palabras clave: chimenea solar, confort térmico, ventilación natural.

Abstract

In general, comfort and health are not taken into account by social housing's (VIS) designers, nor are some issues of ecological sustainability such as, for example, natural ventilation. Two conditions worsen this situation: the first one is that knowledge of scientific comfort through passive strategies is barely known, and the second one is the thought that passive design is unprofitable for builders or for the state. In hot tropics, passive design strategies are complicated due to the high midday insolation (870 W/m^2) and due to the calmly wind. Here a solution is proposed that offers comfort and health through combining various ventilation and thermal load strategies; and its performance and effectiveness were evaluated in an experimental prototype that simulates a VIS' room in Cali (Colombia). It was found that in the original architectural configuration, a typical VIS is completely uninhabitable almost all the day; however some low budget modifications can turn it towards acceptable comfort and healthy levels. In particular solar chimneys proved very effective for air induction during the calm. The considered alternatives were implementable for new or refurbished designs.

Keywords: natural ventilation, solar chimney, thermal comfort.

Fecha de recepción: 21 de octubre de 2015
Fecha de aceptación: 20 de agosto de 2016

INTRODUCCIÓN

En zonas ecuatoriales calientes las viviendas de interés social (VIS), que en Colombia son aquellas de máximo USD 29500 (a 7 de marzo 2016), generalmente presentan problemas de confort y baja ventilación [1] - [3], lo cual, además de nocivo para la salud, es tremendamente decepcionante. Para volver habitables estas viviendas se suelen implementar sistemas de climatización y ventilación mecánica, lo cual agudiza la crisis energética y aumenta el costo de vida. Pocas soluciones incluyen diseños arquitectónicos con un análisis completo de las alternativas de climatización pasiva (*i.e.* que privilegien los procedimientos naturales), y además existen algunos agravantes como, por ejemplo, tener el viento en calma en las horas de mayor asoleamiento [4]. Esto último constituye el caso referente de la ciudad de Cali, localizada a 3° N y 1000 msnm, clasificada según Köppen [5] en el clima “Ecuatorial Totalmente Húmedo” debido a las siguientes características: T media = 23.9 °C, T max-media = 30.5 °C, T min-media = 20 °C, Humedad media = 70 % y una precipitación anual de 1484 mm [6].

A pesar de esto, la ventilación natural puede implementarse efectivamente –como se demostrará en este trabajo- usando dispositivos pasivos como las chimeneas solares. Estas tienen la ventaja que aprovechan la convección natural y son relativamente económicas.

Una apropiada ventilación renueva el aire mínimo 4 veces por hora de acuerdo con la Norma DIN [7], o 7.5 l/s por persona según ASHRAE [8]. También es aquella suficiente para evacuar el calor, olor y contaminación en ambientes interiores [9].

Hedge [10], [11] encontró relaciones entre ambientes con poca ventilación, brotes de enfermedades y con disminución en el rendimiento laboral. Esto refuerza la importancia de la ventilación en un diseño arquitectónico.

Las chimeneas solares son una opción pasiva para inducir ventilación natural que no requiere viento, debido a que se potencializan en los momentos de mayor insolación [12]. Son colectores de radiación solar que concentran la energía para levantar la temperatura del aire atrapado adentro, promoviendo así la convección natural, y haciendo que ocurra un flujo de aire dentro del dispositivo [13], [14]. Parámetros que se deben considerar son la absorptivi-

dad de los materiales, el ángulo de inclinación, el clima, la localización y el asoleamiento [40]. Las chimeneas solares se han empleado para generación eléctrica, como la planta Unión Eléctrica Fenosa de Manzanares (España), 50 kW, 1981/2, [15], y para almacenamiento de energía mediante muros Trombe en la construcción [16], [17].

En las últimas dos décadas, con el advenimiento de la necesidad de preservar el ambiente y aprovechar los recursos naturales, se ha reportado copiosa literatura con abundantes estudios en chimeneas solares como estrategias pasivas de ventilación natural [13], [18], [19], [20].

Las chimeneas solares ofrecen un medio natural de renovación de aire, y a la vez retiran el aire caliente.

La geometría, la inclinación y la incidencia solar son los temas de mayor atención. La inclinación ha sido un asunto muy discutido en varias publicaciones [21], [22], [23].

Respecto al tema ambiental se ha demostrado que el uso de chimeneas solares es propositivo pues evita la emisión de muchas toneladas de CO₂ [24].

La mayoría de los estudios realizados para caracterizar chimeneas han sido experimentales y numéricos; un caso de estudio fue publicado por Mathur *et al.* [25], en el que utilizando una chimenea solar (2.38 m de ancho x 1m de altura) sobre la fachada, expuesta a radiación solar de 700 W/m², alcanzaron 5.6 ACH (Air Change per Hour: renovaciones de aire por hora) en un cuarto de 27 m³. En otro trabajo [26] se reporta que la inclinación afecta el desempeño, y prueban con varios ángulos, e identificaron que hay un mejor “performance” entre 40 y 60° conforme a la latitud. Este rango de inclinación mostró equilibrio entre la ganancia de calor y las pérdidas de presión por fricción [40].

Du Wei *et al.* [27] estudiaron analíticamente el desempeño de una chimenea solar en una edificación de 2 niveles, y encontraron que mejora al aumentar la extensión de la chimenea, siempre que se conserve una relación entre largo y ancho no mayor que 12:1.

Arce *et al.* [28] construyeron una chimenea a escala real que pudo mover en promedio 117 m³/h; el mayor flujo de aire obtenido fue 374 m³/h a las 13:00 horas, bajo 604 W/m² de radiación. Adicionalmente, observaron que

la corriente no solo fue impulsada por el diferencial térmico entre el interior y exterior, sino que fue influenciada complementariamente por el viento.

Afonso *et al.* [29] trabajaron experimentalmente comparando el comportamiento de una chimenea tradicional hecha totalmente de mampostería contra otra hecha de mampostería y vidrio, y concluyeron que la eficiencia de la chimenea solar es entre 10 y 22 % mayor que las tradicionales. También encontraron que engrosar los muros de ladrillo mejora la ventilación en momentos de poca radiación solar, pero en las horas de más brillo retarda la tasa de ventilación. Por el contrario, las paredes delgadas funcionan muy bien en las horas de mayor sol, aunque rápidamente su desempeño disminuye al acercarse el ocaso.

Khedari *et al.* [30] presentan un estudio experimental de una chimenea solar sobre un techo, ubicada en Tailandia, y encontraron que la longitud óptima debe ser menor de 1 m, con inclinación de 30°, y obtuvieron caudales entre 0.08 y 0.15 m³/s-m². Posteriormente [31] reportaron el efecto de la altura de salida del colector en el caudal de aire inducido, y mencionan específicamente el efecto sobre el confort (temperatura ambiente), y destacan que el sombreado que da el colector reduce sensiblemente la carga térmica a costo mínimo; los experimentos fueron simultáneos en dos módulos situados en el techo del edificio. El mismo grupo [32] reporta la factibilidad de usar chimeneas solares para reducir la ganancia de calor, y lograron estabilizar la temperatura interna, y obtuvieron entre 8 y 15 ACH. El experimento se realizó en un salón de clases.

Ziskind *et al.* [33] reportan los resultados numéricos de un modelo a escala de laboratorio que confirma la factibilidad de ventilar espacios pasivamente con chimeneas solares para casos de calentamiento en estado permanente o transitorio.

Jing *et al.* [34] usaron un prototipo de 2 m x 1 m (largo x ancho) con varias alturas del colector para predecir experimentalmente la óptima relación largo-alto, y encontraron que está alrededor de 0.5. La prueba se da con calentamiento artificial en una de las paredes.

Particularmente, para las tipologías de VIS en Cali, Gamboa *et al.* [1] manifiestan que en la mayoría de las viviendas se encontró común el uso de cubiertas de

fibrocemento, que presentan poca resistencia térmica y, en consecuencia, la carga calórica es intensa, lo cual inhabilita muchas viviendas en las horas de insolación. Igualmente comprobaron, con encuestas y cuantificando el confort térmico con el índice de Fanger (PMV-PPD) [35], que mediante la implementación de estrategias pasivas es posible mejorar las condiciones de salubridad y habitabilidad en las VIS ecuatorial de clima caliente [40].

La falta de ventilación y recambio de aire en la vivienda de interés social, aunado a la inconfortabilidad, constituyen una problemática cuya solución hay que procurar de manera técnica, y con factibilidad real de implementarse a gran escala.

Nuestra hipótesis consiste en que en calma y con insolación intensa –como a mediodía en muchas ciudades tropicales y subtropicales– es posible lograr, de manera económica y sostenible, buena calidad de aire y estado de confort.

Este artículo se enfoca en investigar y desarrollar configuraciones y dispositivos pasivos que mejoren la habitabilidad en VIS en clima ecuatorial caliente.

METODOLOGÍA

Las bondades de una estrategia pasiva se proyectan en el diseño y se validan probándolas en una estación experimental. En este caso, dicha estación está constituida por tres módulos con semejanza geométrica y térmica, que suponen una habitación de VIS. La calibración se establece evaluando y comparando simultáneamente (es decir, bajo las mismas condiciones) la temperatura del aire, T_{air} , humedad relativa, HR, temperatura media radiante, T_{mr} , y velocidad del aire, V_{air} [40]; si estos parámetros resultan similares en magnitud, se puede afirmar que los módulos son térmicamente semejantes. Posteriormente se implementan las estrategias pasivas en dos de estos espacios (Módulos 1 y 2), dejando como testigo de referencia el Módulo 3, sin ninguna modificación.

Mejoras en confort y calidad de aire

Dado que existen varios métodos para evaluar el confort [8], [35], [36] y la calidad de aire [37], en este trabajo se optó por el modelo PPD-PMV (siglas en inglés de Predicted Percentage Dissatisfied – Predicted Mean Vote) descrito en [8], el cual es ampliamente usado y aceptado para diseño y valoraciones

de campo de las condiciones de confort. Ofrece mejores condiciones de confort el módulo que tenga menor índice de insatisfechos. Por su parte, una buena calidad de aire se obtiene si las renovaciones mínimas exceden 4 ACH o 7.5 l/s-persona [7], [8]. Con estos parámetros se puede validar si una estrategia es efectiva o no.

Módulos de prueba

Los módulos se construyeron en una azotea abierta libre de perturbaciones y sombras, con muros en panel-yeso y cubierta de fibrocemento ($2.44 \times 2.44 \times 3.58$ m). Teniendo en cuenta que las habitaciones de una VIS se caracterizan por ventilarse tan solo por una cara con vanos muy pequeños, los espacios se hicieron con una sola ventana (vano 0.6×0.6 m) y una puerta de acceso (madera, 0.8×2.10 m), como se ve en la figura 1.

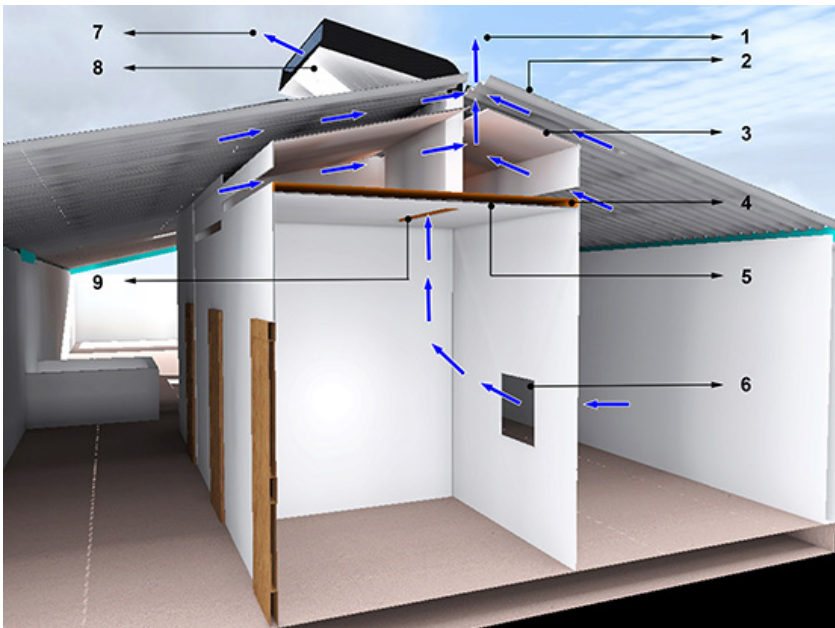


Figura 1: Disposición constructiva de los módulos de prueba [40] y patrones de flujo de aire. 1. Evacuación por cumbre (no dibujada), 2. Cubierta blanca, 3. *foil* de aluminio, 4. Lana de vidrio, 5. Panel-yeso, 6. Ventana, 7. Evacuación chimenea, 8. Chimenea solar, 9. Succión chimenea.

Diseño y configuración de estrategias

Para disminuir la carga térmica por cubierta y muros, y para proveer adecuada renovación de aire, se implementaron las siguientes estrategias: pintar de blanco la cubierta para disminuir la absorptividad de radiación (fibrocemento original $\alpha = 0.9$, pintura blanca $\alpha = 0.4$, con lo cual se refleja mayor cantidad de carga que de otra manera entraría al sistema); instalación de barrera radiante con película (*foil*) de aluminio (emisividad $E_{\text{fibrocemento}} = 0.95$, $E_{\text{aluminio}} = 0.05$ – casi eliminando – la transmisión de calor por radiación); disposición de entretecho con cielo falso en panel-yeso, con aislamiento de lana de vidrio, dejando espacio para circulación con levantamiento de la cumbrera para salida de aire (control de la carga convectiva); y por último, implementación de chimeneas solares (para renovación de aire y evacuación de calor).

La figura 1 ilustra la localización y materialidad de cada intervención, y el patrón de ventilación en las cámaras de aire y la chimenea solar. La figura 2 muestra la implementación en sitio.



Figura 2. Fotografía del espacio externo (parte superior izquierda), el interior del cielo (parte superior derecha) y las chimeneas externas (parte inferior).

Desde el punto de vista constructivo, las chimeneas solares se diseñaron para adaptarse al sistema de cubierta, aprovechando los vacíos que poseen las tejas-claraboyas y las cumbres (ambas disponibles en el mercado). Nótese que en la región ecuatorial las chimeneas solo tienen sentido en el techo, dado que el curso del sol alterna entre fachadas (N y S) (a diferencia de las latitudes templadas, donde siempre inciden sobre la misma fachada). Inicialmente se calcularon las cargas térmicas ganadas por el espacio usando el método propuesto por Cengel [38] (que sustancialmente sigue a ASHRAE [8]), y se concluyó la necesidad de evacuar 890 W. Para evitar que esta energía se acumule y termine por elevar la temperatura del recinto — colapsando el confort térmico — se calculó el caudal de aire necesario para evacuar ese calor (con potencial térmico de 3 °C entre entrada y salida), resultando necesario 707 m³/h. Este caudal fue insumo para dimensionar el ducto de la chimenea; el método seguido [39] permite encontrar el tiro de la chimenea y las pérdidas por fricción, accesorios y cambios de dirección [40]. Con esto se determinó que el área mínima requerida es 0.2 m² para una altura del ducto de 2 m. De acuerdo con lo anterior, para acoplarse a la cumbre se seleccionó una chimenea de sección 0.15 m x 1.4 m; mientras que para la teja-claraboya fue de 0.36 m x 0.58 m. Los detalles de estos cálculos están fuera del alcance de esta publicación y pueden consultarse en otro documento [40]; un resumen de las ecuaciones utilizadas se puede apreciar en la tabla 1. El diseño se presenta en la figuras 3 y 4.

Tabla 1: Resumen de ecuaciones para dimensionamiento de chimenea [40]

DESCRIPCIÓN	FORMULACIÓN
Flujo de aire requerido Cengel [38], Fox <i>et al.</i> [39].	$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta_t$ Donde: Q= Carga térmica m=Flujo de aire requerido C _p =Constante de poder calorífico del aire. Δ _t = Diferencia de temperaturas
Pérdidas mayores de presión en ductos. Fox <i>et al.</i> [39].	$P_{max} = F_f \cdot (L/\varnothing) \cdot (V^2/2)$ Donde: P _{max} = Pérdidas mayores F _f = Factor de Fricción L= Longitud del tubo ϕ= Diámetro equivalente V ² = Velocidad del fluido al cuadrado

DESCRIPCIÓN	FORMULACIÓN
Pérdidas menores de presión en ductos. Fox <i>et al.</i> [39].	$P_{min} = (K+E) * V^2/2$ Donde: P_{min} = Pérdidas menores K= Coeficiente por tipo de accidente. E= Coeficiente por tipo de entrada. V^2 = Velocidad del fluido al cuadrado.
Pérdidas Totales de presión en ductos. Fox <i>et al.</i> [39].	$P_{total} = P_{max} + P_{min}$ Donde: P_{total} = Pérdidas Totales P_{max} = Pérdidas mayores P_{min} = Pérdidas menores
Tiro de la chimenea. Fox <i>et al.</i> [39].	$\Delta_p = G*(D_{ent} - D_{exit})*h$ Donde: Δ_p = Tiro de la chimenea. G= Gravedad. D_{ent} = Densidad del fluido en la entrada. D_{exit} = Densidad del fluido a la salida. h= Diferencia de alturas entre entrada y salida del fluido.

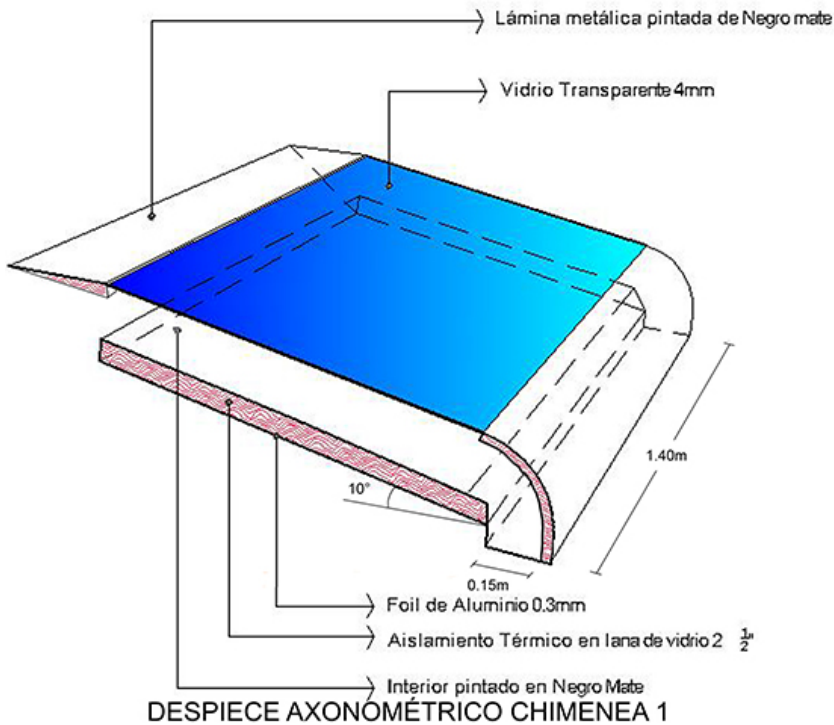


Figura 3. Diseño y dimensionamiento de la chimenea 1

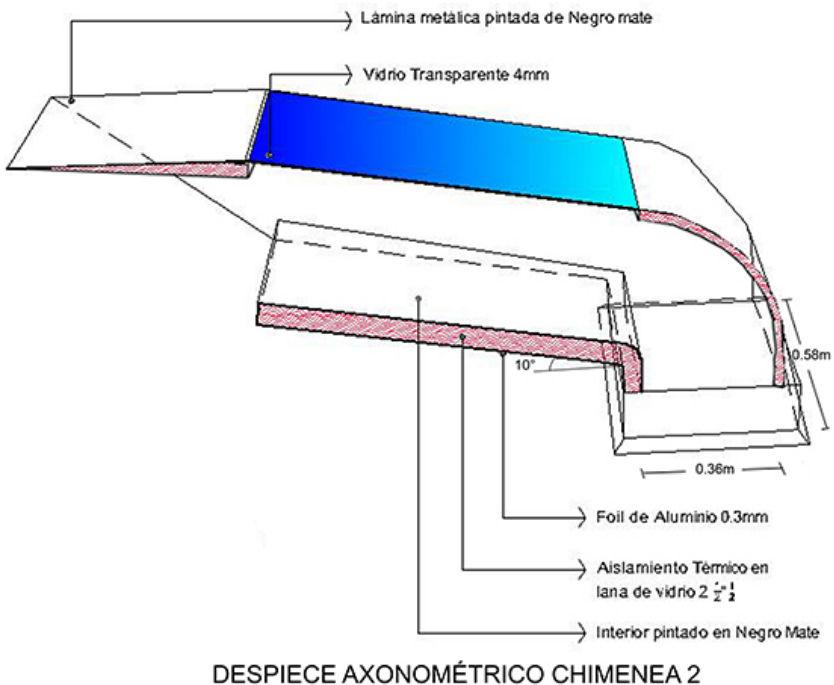


Figura 4. Diseño y dimensionamiento de la chimenea 2

RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

La medición de velocidad del aire, V_{air} , se efectuó con anemómetros de hilo caliente marca CEMDT-8880 rango 0.125 m/s, resolución 0.01 m/s, precisión $\pm 5\%$. Para la medición de T_{air} y HR se usaron Termo-higrómetros *dataloggers* marca EXTECHRHT10 con rango de humedad 0 a 100 %, precisión de $\pm 3.5\%$. La temperatura de las superficies se midió con termómetro infrarrojo marca EXTECH 42500 de precisión $\pm 2\%$.

Para comprobar la semejanza térmica entre módulos se realizaron mediciones durante cinco días consecutivos, registrándose T_{air} y HR cada 60 minutos; los *dataloggers* fueron ubicados tres en el centro de cada módulo y uno al aire libre, a una altura de 1.50 m. La velocidad del aire se midió, para el interior, en el centro de las ventanas, y para el exterior a 1.50 m del piso. La temperatura media radiante T_{mr} fue calculada con los registros, hora a hora, del termómetro infrarrojo, y usando los factores de forma correspondientes al módulo [41].

Las diferencias máximas absolutas de HR dentro de los módulos no superaron el 3 %, y ocurren a medio día (12:00 a 14:00 h). La diferencia máxima media de temperatura de aire interior, T_{air} , fue menor a 1 °C, con máxima absoluta de 35.5 °C. Referente a la temperatura media radiante T_{mr} , la diferencia máxima promedio fue menor a 0.2 °C, con máxima absoluta de 44.5 °C; análogamente, para la velocidad interior, V_{air} , la diferencia no superó 0.05 m/s. Estos resultados validan completamente la consideración que los módulos son térmicamente equivalentes.

También se pudo comprobar que la V_{air} en el interior de los espacios es muy baja, siendo la máxima absoluta menor que 0.5 m/s y la máxima media del orden de 0.3 m/s, tendiente a cero en las horas del mediodía, precisamente cuando la T_{air} y T_{mr} son las más altas. El cálculo del confort térmico según Fanger [35] arroja los índices PMV de sensación térmica, mostrados en la figura 5, y PPD de porcentaje de personas insatisfechas, mostrados en la figura 6. Esto indica que las habitaciones típicas de la VIS de Cali son muy calurosas, solo tolerables después de las 18:00 h, cuando el porcentaje de insatisfacción baja hasta órdenes aceptables (20 % insatisfechos), y son completamente inhabitables entre las 12:00 y 14:00 h.

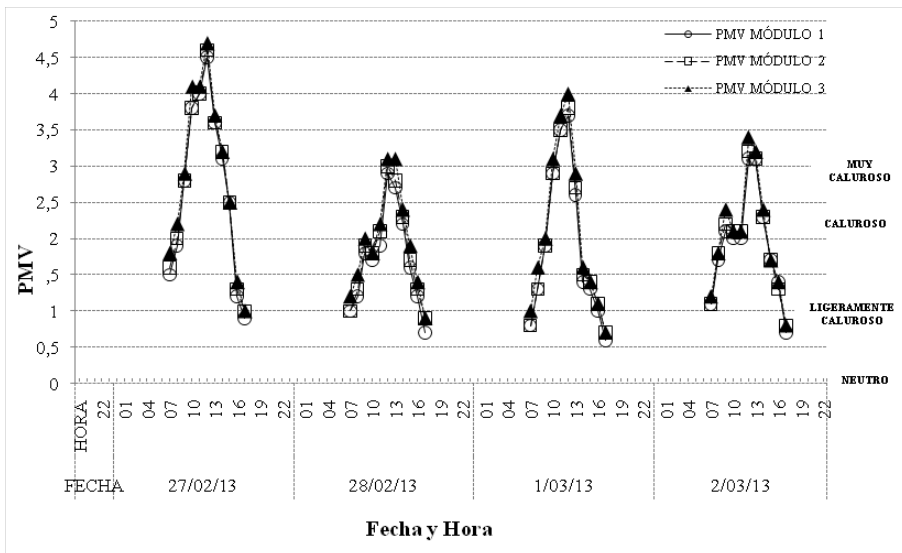


Figura 5. Pruebas de calibración y semejanza para confort en los módulos: sensación térmica voto medio-PMV

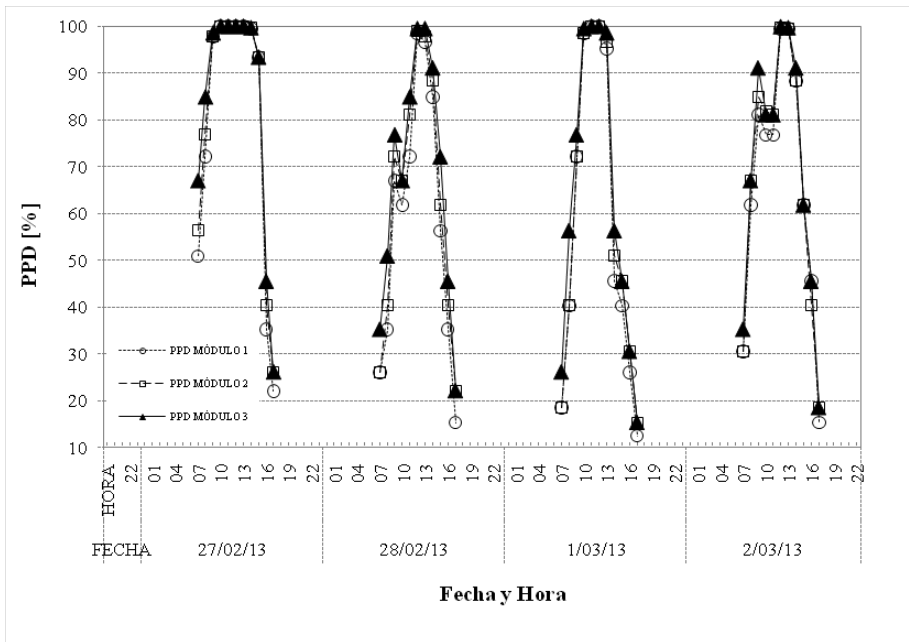


Figura 6. Pruebas de calibración y semejanza para confort en los módulos: índice de porcentaje de insatisfechos PPD

Las pruebas de los módulos con las estrategias bioclimáticas implementadas se efectuaron durante siete días consecutivos de manera similar, como se hicieron en la etapa anterior de validación de semejanza. Las únicas novedades fueron que el anemómetro se localizó justo a la descarga del ducto de salida de las chimeneas, y que se adicionó un *datalogger* para registro de la temperatura de aire en el interior de la chimenea (T_{air-ch}). Como se aprecia en la figura 7, las temperaturas T_{air} más altas se tomaron en el ambiente exterior y en el Módulo 3. En este último, durante el 70 % del tiempo computado entre las 8:00 a 18:00 h se exceden los 28 °C. En contraste, en los módulos intervenidos 1 y 2 se exceden tan solo el 40, y 50 % del tiempo, respectivamente; lo cual es indicio de los momentos de inconfortabilidad, pues el aire, prácticamente estancado dentro Módulo 3, explica esta situación. La mayor diferencia de T_{air} acontece al mediodía cuando el comportamiento del módulo testigo se separa entre 3 y 5 °C respecto a los módulos 1 y 2, lo cual favorece levemente la configuración del Módulo 1.

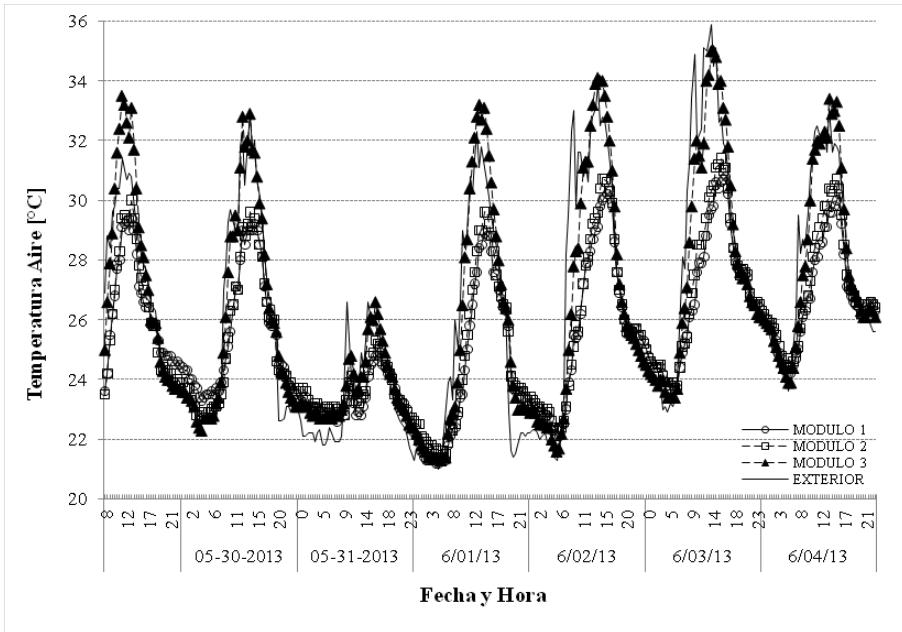


Figura 7. Temperatura aire exterior e interior de los módulos en función del tiempo

La humedad relativa dentro de los espacios, HR, se ilustra en la figura 8, en la que se muestra que los datos son completamente coherentes con la T_{air} interior; aunque hay que resaltar que los bajos valores que se alcanzan a mediodía podrían causar resequeza corporal en algunos individuos.

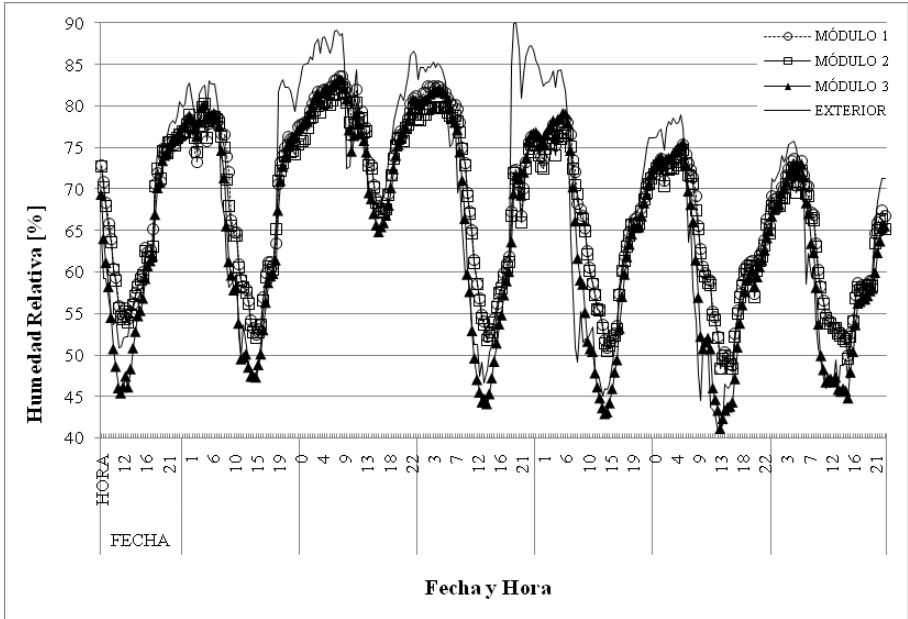


Figura 8. Comparativo de humedad relativa exterior e interior módulos en función del tiempo

Respecto a los resultados de la T_{mr} mostrados en la figura 9, se observa que en los módulos con mejoras no se superan los $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, magnitud muy similar a la T_{air} , mientras que en el testigo de referencia llegó hasta los $35.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual genera diferencias de hasta $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto es atribuible a que el flujo de aire por la chimenea evacua una buena proporción de la carga térmica, y que la T_{air} tiende a equilibrarse con la de la pared (por efecto de la convección interna); además, el canal de circulación natural de aire externo, contiguo a la cubierta, más la barrera radiante de película de aluminio, constituyen una resistencia térmica considerable que se revierte positivamente en disminución en la temperatura superficial del techo.

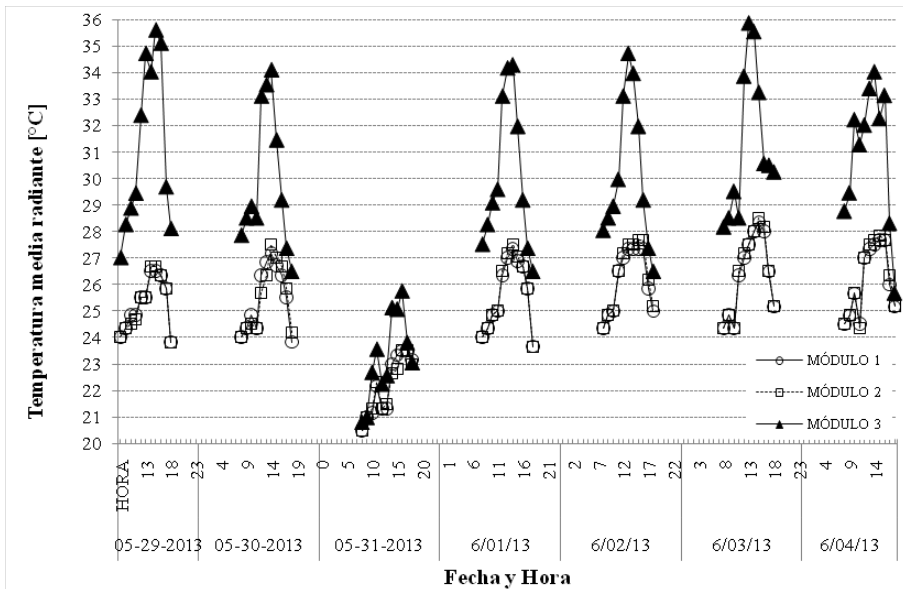


Figura 9. Temperatura media radiante en interior de los módulos como función del tiempo

La Vair se presenta en la figura 10. En el ambiente exterior no excede 0.5 m/s durante la mañana; después, a las 12:00 h, disminuye hasta 0 m/s, y se eleva a partir de las 16:00 h, alcanzando 1.76 m/s. El Módulo 3 muestra registros muy cercanos a cero que solo cambian al final de la tarde cuando la Vair exterior es muy alta, pero sin superar 0.5 m/s. Esto resulta obvio si se tiene en cuenta que una sola ventana es insuficiente para trasegar el aire. En cuanto al desempeño de las chimeneas, se observa que funcionan mejor a mediodía e inducen un flujo considerable; la chimenea 1 (Módulo 1) fue capaz de mover el aire a 0.95 m/s cuando la radiación solar marcó 847 W/m² (tomada de la estación meteorológica PTAR-CALI de Cenicaña [42]) y su Tair-ch llegó a 80 °C. Bajo las mismas condiciones, la chimenea 2 (Módulo 2) logró 0.71 m/s con Tair-ch de 71 °C. En general, el rendimiento de la primera fue 20 % mejor que la segunda. Después de las 16:00 h, el efecto de vena contracta del viento favorece el flujo de aire casi duplicándolo, observación similar a la reportada por [28].

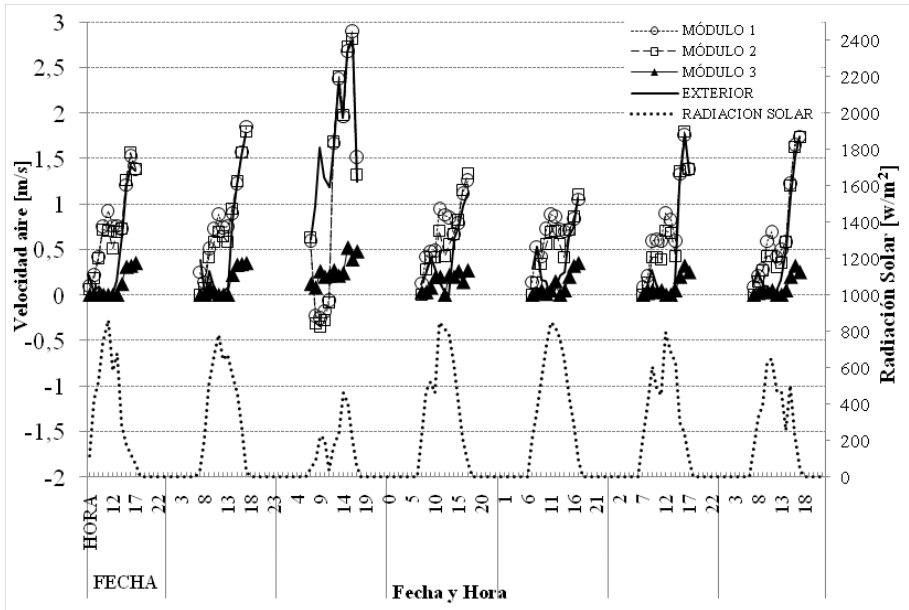


Figura 10. Velocidad de aire exterior e interior en los módulos, e irradiación solar [22], en función del tiempo

El análisis de Calidad de Aire puede leerse en la figura 11; esta gráfica muestra los ACH impulsados por las chimeneas 1 y 2, cuyo promedio fue 34.5 y 27.3, respectivamente, lo cual claramente sobrepasa el mínimo de 4 ACH requerido por salubridad; en contraste, el módulo no intervenido tan solo logra sobrepasar este límite a partir de las 16 horas cuando el viento exterior aumenta. El caudal promedio evacuado por sendas chimeneas fue de 514 y 408 m³/h, respectivamente, valores inferiores a los 707 m³/h demandados para evacuar el calor; esto indica que no es suficiente esta estrategia pasiva y deben considerarse recursos suplementarios.

La figura 11 permite ilustrar el efecto positivo de las chimeneas en la higiene y el confort; sin ellas el caudal sería casi nulo, y por tanto no habría remoción de contaminantes ni de calor, y en consecuencia, se subirían la temperatura del ambiente interior y de las paredes, y se convertiría en un espacio con calor intenso para los habitantes.

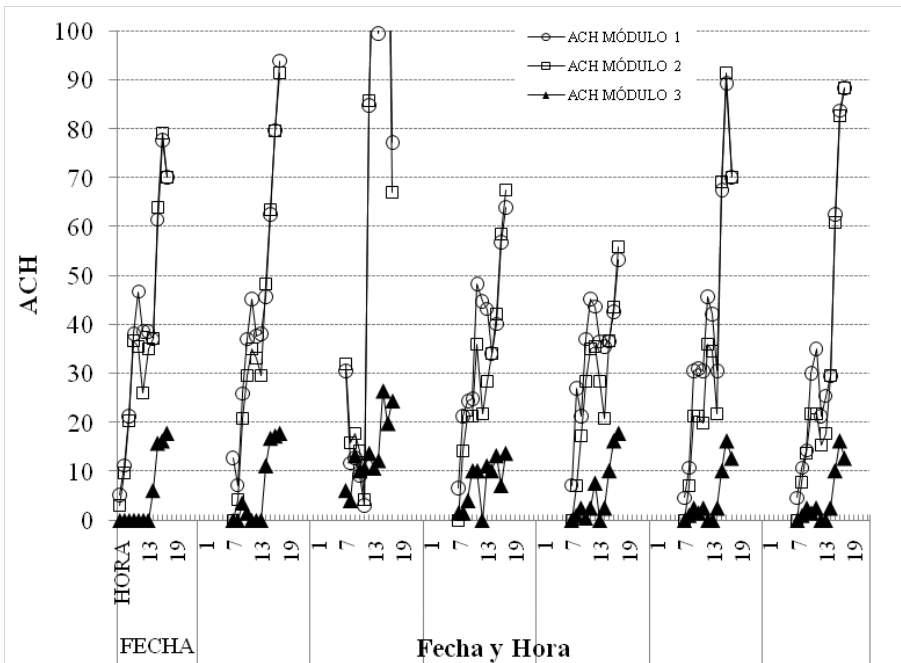


Figura 11. Intercambios de Aire por Hora en los módulos en función del tiempo

La figura 12 ilustra los resultados del confort (PPD) donde se aprecian las bondades de las intervenciones pasivas. Comparativamente, durante las horas de mayor brillo (entre las 10:00 y las 16:00 h), en el módulo testigo la mitad de los ocupantes estarían insatisfechos cerca del 70 % del tiempo, mientras que en el Módulo 1 menos del 20 %, y en el Módulo 2 menos del 30%, lo cual se acerca a la condición de tolerancia y aceptabilidad. Separadamente se analizó el lluvioso 31 de mayo, cuando la situación de confort se mantuvo “Ligeramente fresca”, y el Módulo 3 infiere una menor cantidad de insatisfechos que los módulos 1 y 2 debido a que guarda mejor el calor (véase la figura 13).

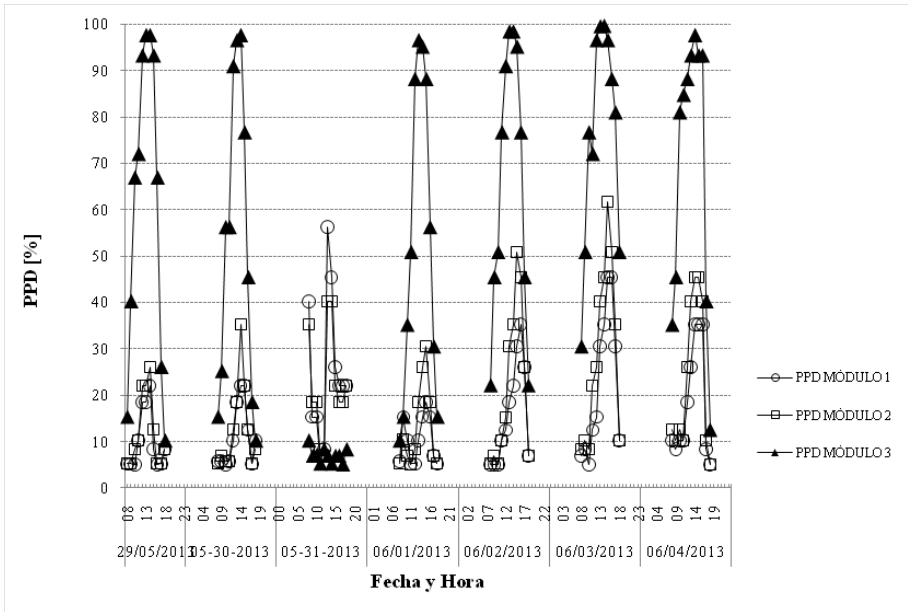


Figura 12. Confort térmico según índice de Fanger: Porcentaje de insatisfechos PPD en función del tiempo

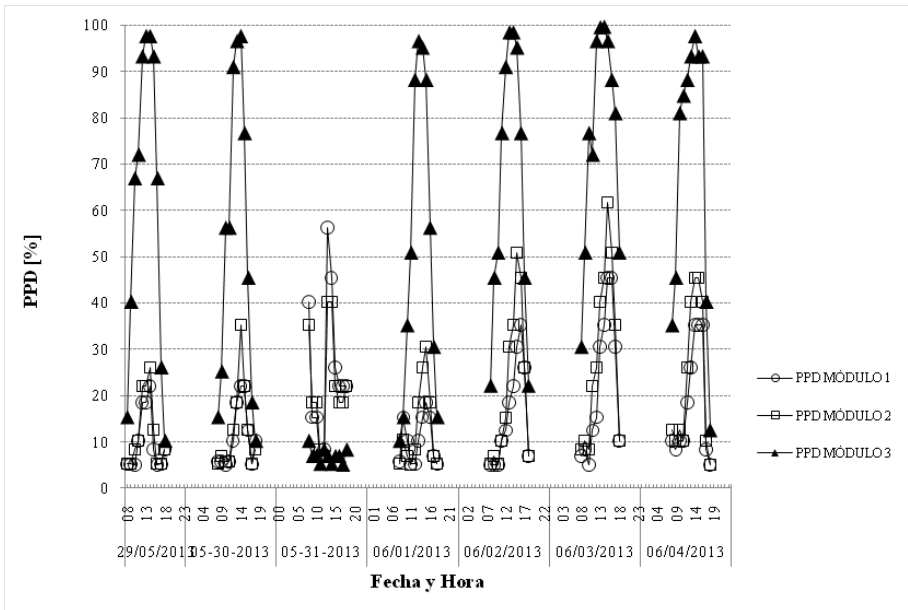


Figura 13. Confort térmico según índice de Fanger: sensación térmica PMV en función del tiempo

En virtud de que este estudio se centra en la comunidad de bajos ingresos, el costo de las intervenciones puede ser vital, y se calculó del orden de 137 dólares por dormitorio (véase tabla 2), cifra apenas superior al costo de un ventilador y menos de la mitad del precio de la instalación de un aire acondicionado, sin considerar costos de operación y mantenimiento, ni las valoraciones de ciclo de vida, huella ecológica, o carga emitida de CO², que marcarían ventaja adicional para las chimeneas solares [40].

Tabla 2. Presupuesto de inversión económica para implementación de estrategias pasivas (Colombia, 2000 COP/USD - junio de 2013) [40]

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario USD	Valor total USD
Vinilo tipo 1 (2 manos)	gal	0.2	21.64	4.33
Agua	l	60.0	0.01	0.45
Panel yeso Gyplac 12,7 mm 1,22 x 2,44	Unidad	2.0	6.17	12.34
Vigueta cal 26 x 2,44	Unidad	7.0	0.98	6.83
Omega cal 26 x 2,44	Unidad	3.5	0.98	3.41
Ángulo cal 26 x 2,44	Unidad	5.0	0.48	2.38
Tornillo placa	Unidad	119.0	0.00	0.48
Tornillo hormiga	Unidad	60.0	0.00	0.24
Foil de aluminio	m ²	6.0	0.75	4.50
Cartón respaldo	m ²	6.0	0.25	1.50
Lana de vidrio + fresca	Rollo	0.2	60.77	12.15
Contrato suministro e instalación de chimenea solar	Unidad	1.00	47.5	47.50
Mano de obra				
Mano de obra albañilería 1 ayudante	h/hombre	3.0	4.50	13.50
Mano de obra panel 1 ofc. + 1 ayu.	h/cuadrilla	3.0	8.70	26.09
Equipo				
Andamio tubular	Unidad/día	4.2	0.36	1.50
Total habitación				\$ 137

Consideraciones alternativas como aislamientos o reflectantes especiales en paredes y techos (poliuretanos, etcétera), los cuales podrían aumentar la resistencia térmica y agregar inercia térmica, no son estudiadas en este trabajo en razón de que harían inviable económicamente los proyectos VIS, y

además su eficacia no supera la de las barreras radiantes [38]. Por otra parte, las cubiertas típicas de mayor uso siguen siendo en fibrocemento, que no brinda mayor inercia térmica ni tampoco se vislumbra sustitución pronta.

CONCLUSIONES

Mediante simulación experimental de una habitación típica de vivienda de interés social (VIS) se comprobó que en clima ecuatorial no se alcanzan condiciones de confort; además, al mediodía son prácticamente inhabitables.

A partir de intervenciones arquitectónicas pasivas, susceptibles de implementarse a bajo costo en este tipo de vivienda, fue posible mejorar la condición de confortabilidad hasta valores aceptables. Esto se comprobó midiendo las temperaturas y el confort en tres módulos experimentales.

La adaptación de chimeneas solares al sistema constructivo de cubierta de fibrocemento –muy común en las VIS de Cali [1], [40] y en otras regiones tropicales y subtropicales- fue completamente viable, sin perjudicar la estabilidad de la edificación. Además, el flujo de aire inducido por estas chimeneas garantiza una renovación que brinda calidad de aire y remoción significativa de la carga térmica.

De acuerdo con el análisis de costos, las intervenciones bioclimáticas propuestas están económicamente al alcance de la comunidad de bajos ingresos que normalmente ocupan estas VIS. Además, no generan gastos de operación y mantenimiento sensibles.

Las condiciones de radiación solar alta (típica de la zona ecuatorial ~ 847 W/m²) y viento en calma ($V_{air} \sim 0$ m/s) potencializan el uso de chimeneas solares como una técnica pasiva efectiva, pues provee renovación de aire, retiro de carga térmica y de paso da sombra a la cubierta. La efectividad de las chimeneas mejora si se proyectan en la dirección del viento, pues el efecto de vena contracta contribuye a la succión.

Se demostró cierta la hipótesis de que es posible construir una VIS que en condiciones de viento en calma y con insolación intensa ofrezca buena calidad de aire y estado de confort, de manera económica y sostenible. Demostración que siguió un método analítico y se verificó experimentalmente. Lo anterior coadyuva a establecer las bases para diseños y configuraciones

arquitectónicas sostenibles y económicas, útiles para la adecuación, remodelación, o diseños de VIS confortables y saludables.

Como recomendación futura, se debe considerar que cuando el viento sopla contra el desfogue de la chimenea, la presión podría invertir el flujo empujándolo hacia adentro y, como el aire está caliente, causaría un efecto indeseable. Para controlar esta situación se pueden implementar láminas plásticas dispuestas al pario, que en contraflujo cierran la entrada (como una válvula de no retorno o cheque). Sería muy beneficioso desarrollar una válvula cheque o un sistema que impida la inversión del flujo. Otro factor que favorecería el confort en VIS es mediante la aplicación de superficies interiores de baja emisividad o recubrimientos con aluminio pulido [1].

REFERENCIAS

- [1] J. Gamboa *et al.*, *Confort Ambiental en Vivienda de Interés Social de Cali*. Cali: Programa Editorial Universidad del Valle, 2011.
- [2] Universidad del Pacífico, *Investigando ando. Ciudadela Nueva Buenaventura. Errores arquitectónicos y soluciones*, 2013. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=o74GDOHTpDM>
- [3] A. Iturre, "Proyectar mejoras del confort térmico en la vivienda de interés social Buenaventura: casa barrio ciudadela nueva Buenaventura". Tesis de Maestría, Escuela de Arquitectura Universidad del Valle, Cali, 2013.
- [4] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, *Régimen anual de los vientos*, 2014. [Online]. Available: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>
- [5] M. Kottek *et al.*, World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 15, n° 3, 259-263, June 2006). Doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- [6] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], *Tiempo y Clima en Colombia*. Available online: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima,2016>.
- [7] *Standard DIN 1946-6 - Ventilation and air conditioning - Part 6*, Deutsches Institut für Normung, 2009.
- [8] *ASHRAE Handbook Fundamentals*. ASHRAE, Atlanta, GA, 2005.
- [9] M. Santamouris and D. Asimakopoulos, *Passive cooling of buildings*. London: James & James (Science Publishers), 1996.

- [10] Cornell University, *Course DEA350: Ambient Environment: Thermal Comfort, Biogenic particles*, 2004. [Online]. Available: <http://ergo.human.cornell.edu/studentdownloads/DEA350notes/Thermal/thcomnotes1.html>
- [11] A. Hedge, *Linking Environmental Conditions to Productivity*, 2004. [Online]. Available: <http://ergo.human.cornell.edu/studentdownloads/DEA350notes/Thermal/thcomnotes1.html>
- [12] R. Priyadarsini *et al.*, "Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system", *Energy Build*, vol. 36, n° 1, pp. 61-71, Jan., 2004. Doi:10.1016/S0378-7788(03)00076-8.
- [13] R. Khanal and C. Lei, "Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation", *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 8, pp. 1811-1819, July, 2011. Doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.035.
- [14] P. F. Linden, "The fluid mechanics of natural ventilation", *Annual Review on Fluid Mechanics*, vol. 31, pp. 201-238, 1999.
- [15] Schlaich Bergermann and Partner, Structural Consulting Engineers, *The Solar Chimney*, 2002. [Online]. Available: https://www.math.purdue.edu/~lucier/The_Solar_Chimney.pdf
- [16] C. Moreno, "Simulación numérica de flujos convectivos a altos números de Rayleigh en sistemas pasivos de climatización", proyecto de fin de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia, 2007.
- [17] Y. Kaneko *et al.*, "Ventilation performance of solar chimney with built-in latent heat storage", CSEM-UAE Innovations Inc., 2007.
- [18] C. Hoy-Yen *et al.*, "Review of passive solar heating and cooling technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 781-789, 2010. Doi:10.1016/j.rser.2009.10.030.
- [19] S. Chungloo, "The Field Investigation of Dimensionless Convection Heat Transfer Coefficient in the Inclined Roof Solar Chimney", *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, vol. 6, Issue 1, 2009.
- [20] J. Khedari, "Experimental investigation of free convection in roof solar collector", *Building and Environment*, vol. 37, n° 5, pp. 455-459, 2002.
- [21] I.F. Hamdy, "Passive solar ventilation", *Renewable Energy*, vol. 14, pp. 381-386, 1998.
- [22] R. Bassiouny, "Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate", *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 190-196, 2009.
- [23] E. P. Sakonidou *et al.*, "Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow", *Solar Energy*, n° 82, pp. 80-94, 2008.

- [24] N. Agya Utama *et al.*, "Passive Application through Solar Induce Ventilation on Sustainable Building in Equatorial Hemisphere", *Procedia Environmental Sciences*, vol. 20, pp. 126-130, 2014.
- [25] J. Mathur *et al.*, "Experimental investigations on solar chimney for room ventilation", *Solar Energy*, vol. 80, n° 8, pp. 927-935, 2006; Doi:10.1016/j.solener.2005.08.008.
- [26] J. Mathur *et al.*, "Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation", *12 Energy and Buildings*, vol. 10, n° 38, pp. 1156-1163, Sept. 2006. Doi:10.1016/j.enbuild.2006.01.006.
- [27] Du Wei *et al.*, "A study of the ventilation performance of a series of connected solar chimneys integrated with building", *Renewable Energy*, vol. 36, n° 1, pp. 265-271, Jan. 2011. Doi:10.1016/j.renene.2010.06.030.
- [28] J. Arce *et al.*, "Experimental study for natural ventilation on a solar chimney", *Renewable Energy*, vol. 34, n° 12, pp. 2928-2934, Dec. 2009. Doi:10.1016/j.renene.2009.04.026.
- [29] C. Afonso and A. Oliveira, "Solar chimneys: simulation and experiment", *Energy and Buildings*, vol. 32, n° 1, pp. 71-79, 2000. Doi:10.1016/S0378-7788(99)00038-9.
- [30] J. Khedari *et al.*, "Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new habitations", *Renewable Energy*, vol. 8, pp. 335-338, 1996.
- [31] J. Khedari *et al.*, "Field measurements of performance of roof solar collector", *Energy and Buildings*, vol. 31, pp. 171-178, 2000.
- [32] J. Khedari *et al.*, "Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building", *Energy and Buildings*, vol. 32, pp. 89-93, 2000.
- [33] G. Ziskind *et al.*, "Ventilation by natural convection of a one-story building", *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 91-101, 2002.
- [34] H. Jing *et al.*, "Experimental study of the prediction of the ventilation flow rate through solar chimney with large gap-to-height ratios", *Building and Environment*, vol. 89, pp. 150-159, 2015.
- [35] *Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, ISO Standard 7730, 2005.
- [36] *Standard 55: Thermal environmental conditions for humans occupancy*, ANSI/ASHRAE, 2010.
- [37] *Standard 62: Ventilation for acceptable indoor air quality*, ANSI/ASHRAE, 2001.
- [38] Y. Cengel, *Heat Transfer: A practical approach*. McGraw-Hill, 1998.

- [39] R. Fox *et al.*, *Introduction to Fluid Mechanics*. Wiley, 2004.
- [40] W. Giraldo, “Diagnóstico y mejoramiento del comportamiento térmico y la ventilación en viviendas de interés social en Cali con medios pasivos”. Tesis de Maestría, Escuela de Arquitectura Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2013.
- [41] J. Lienhard IV and J Lienhard V, *A Heat Transfer Book*. Cambridge, MA: Phlogiston, 2011. [Online]. Available: <http://ahtt.mit.edu>
- [42] Cenicaña, Centro de Investigación de la caña de azúcar de Colombia, 2013. [Online]. Available: <http://www.cenicana.org>